

História da Física e Ciências Afins

La unificación de luz, electricidad y magnetismo: la “síntesis electromagnética” de Maxwell (*The unification of light, electricity and magnetism: Maxwell’s electromagnetic synthesis*)

Augusto Beléndez¹

Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal, Universidad de Alicante, Alicante, España
Recebido em 21/8/2007; Aceito em 3/1/2008; Publicado em 21/7/2008

A comienzos del siglo XIX la luz, la electricidad y el magnetismo eran considerados tres fenómenos independientes. Mientras que el interés por la óptica estaba justificado por su aplicación a la construcción de instrumentos ópticos, los fenómenos eléctricos y magnéticos podían resultar interesantes para los científicos, pero carecían de trascendencia al no haber dado lugar a aplicaciones prácticas. En este trabajo, y tras una breve descripción de la situación de la electricidad, el magnetismo y la óptica a comienzos del siglo XIX, se presenta la unificación de la electricidad y el magnetismo con figuras como Oersted, Ampère y Faraday, y se concluye con la “síntesis de Maxwell” de la electricidad, el magnetismo y la luz, de tanta relevancia como en su día fue “la síntesis newtoniana” de la física de los cielos y la física terrestre. Esta “síntesis de Maxwell” constituye uno de los mayores logros de la física, pues no solamente unificó los fenómenos eléctricos y magnéticos, sino que permitió desarrollar toda la teoría de las ondas electromagnéticas, incluyendo la luz. A partir de Maxwell, otra parcela de la física hasta entonces independiente, la óptica, quedó en cierta medida englobada en el electromagnetismo.

Palabras-clave: electromagnetismo, electromagnetismo, historia de la física, Oersted, Ampère, Faraday, Maxwell.

In the early nineteenth century, light, electricity and magnetism were considered as three independent phenomena. While interest in optics was justified by its application to the manufacture of optical instruments, electrical and magnetic phenomena could be interesting for scientists but they had no practical applications. In this work, and after a brief description of the status of electricity, magnetism and optics in the early nineteenth century, the unification of electricity and magnetism is presented with figures like Oersted, Ampère and Faraday, concluding with “Maxwell’s synthesis” of electricity, magnetism and light, which was as relevant as “the Newtonian synthesis” of the heaven physics and earth physics. This “Maxwell’s synthesis” is one of the greatest achievements in physics, because it did not only unify electrical and magnetic phenomena, but allowed to develop the whole theory of electromagnetic waves, including light. From Maxwell, another hitherto independent field of physics, optics, was to a certain extent included in electromagnetism.

Keywords: electromagnetism, history of physics, Oersted, Ampère, Faraday, Maxwell.

1. Introducción

Sin riesgo a equivocarse, puede decirse que el electromagnetismo moderno está basado en una invención y dos descubrimientos, realizados todos ellos en el primer tercio del siglo XIX [1, 2]. La invención es la construcción de una fuente de corriente eléctrica continua, la pila eléctrica, llevada a cabo por Volta hacia 1800. Gracias a este invento “la electricidad triunfa” [2]. Los dos descubrimientos son la demostración de los efectos magnéticos producidos por corrientes eléctricas realizada por Oersted y Ampère en 1820 y la generación de corriente eléctrica a partir de campos magnéticos obtenida por Faraday en 1831 [1,2]. Los trabajos de Oersted y Ampère permitieron sentar las bases experi-

mentales y matemáticas del electromagnetismo, mientras que Faraday es el responsable, además, de la introducción del concepto de “campo” para describir las fuerzas eléctricas y magnéticas [1-6], idea revolucionaria en su día pues suponía apartarse de la descripción mecanicista de los fenómenos naturales al más puro estilo newtoniano, es decir, mediante “acciones a distancia” [2] sin intermediación de medio alguno. Con estas tres contribuciones se habían puesto los pilares del moderno electromagnetismo, cerrado por la aportación de James Clerk Maxwell, ya en el último tercio del siglo XIX [4, 5]. Con Oersted y Ampère primero, y los trabajos de Faraday después, empieza a gestarse la síntesis electromagnética de Maxwell [2]. La formulación matemática

¹E-mail: a.belendez@ua.es.

de Maxwell de los fenómenos electromagnéticos descritos por sus predecesores supuso para la electricidad, el magnetismo y la luz una síntesis - “la síntesis de Maxwell” -, de tanta relevancia como en su día fue “la síntesis newtoniana” de la física de los cielos y la física terrestre, es decir, del movimiento de los planetas y la caída de los cuerpos [6]. Desde el siglo XVII no se había producido en la ciencia una teoría unificadora igualable a la de Newton y Maxwell lo hizo, aportando el soporte conceptual y la formulación matemática necesaria para elevar el electromagnetismo a las más altas cotas de la física. Esta unificación resulta de tal importancia que los historiadores incluyen entre los grandes inventos de la humanidad el descubrimiento de la relación entre la electricidad y el magnetismo, junto con la invención de la rueda y el establecimiento de los sistemas de numeración [1]. Las ecuaciones que introdujo Maxwell permiten describir la interacción electromagnética, fundamentada en la idea de que los campos eléctrico y magnético son descripciones complementarias que se derivan de la misma propiedad básica de la materia: la carga eléctrica. Esta “síntesis de Maxwell” constituye uno de los mayores logros de la física, pues no solamente unificó los fenómenos eléctricos y magnéticos, sino que permitió desarrollar toda la teoría de las ondas electromagnéticas, incluyendo la luz [1]. De este modo, a partir de Maxwell, otra parcela de la física hasta entonces independiente, la óptica, quedó en cierta medida englobada en el electromagnetismo [1, 4, 7].

2. Tres fenómenos independientes

En los albores del siglo XIX la física, todavía denominada “filosofía natural”, estaba plenamente dominada por la herencia newtoniana. La mecánica y la astronomía, o más bien la mecánica celeste, eran las dos disciplinas que habían llegado a alcanzar un mayor desarrollo fundamentalmente por la aplicación de las matemáticas [2]. La mecánica había abordado con éxito la resolución de un gran número de problemas mediante la aplicación de un tratamiento abstracto: la mecánica analítica. Además, para la resolución de los problemas mecánicos no era necesario formular ninguna hipótesis sobre la constitución de la materia o la naturaleza de las fuerzas ejercidas entre sus componentes básicos [2]. En contraste con ello, otros campos de la física, como el calor, la luz, la electricidad y el magnetismo, se explicaban de una forma totalmente especulativa y cualitativa, y se suponía la existencia de toda una serie de sustancias hipotéticas, fluidas y desprovistas de peso, de ahí el calificativo de imponderables, como el calórico, el éter, los fluidos eléctricos o los fluidos magnéticos [2]. En realidad, la introducción de estos fluidos fue un intento de materializar los fenómenos naturales en pleno apogeo del mecanicismo newtoniano. Además, la electricidad, el magnetismo y la luz eran considerados desde la antigüedad como tres fenómenos independientes, sin

ninguna relación entre ellos [6].

2.1. Electricidad [1, 6]

El fenómeno de la electricidad era conocido desde la antigua Grecia y su nombre mismo es de origen griego [6, 8]. Electricidad proviene de la palabra griega *electrón*, es decir, “ámbar”, ya que era conocida la propiedad del ámbar de generar electricidad estática al ser frotado y atraer pequeños trocitos de tela o papel y el concepto de fuerza eléctrica tuvo su origen en experimentos muy sencillos como la frotación de dos cuerpos entre sí. Cuando se frota una varilla de vidrio o de ámbar con un trapo o una piel, aquéllas atraen pequeños trocitos de papel. Si se frota una barra de ámbar con un trozo de piel y se suspende de un hilo y se le aproxima una segunda barra de ámbar, frotada también con una piel, se observa que ambas barras se repelen. Lo mismo sucede si las dos barras son de vidrio pero frotadas con un trozo de seda. Sin embargo, si se aproxima una barra de ámbar frotada con una piel a una barra de vidrio frotada con un paño de seda, ambas suspendidas de sendos hilos, se observa que las barras se atraen entre sí. Esto permitió concluir que existían dos tipos de electricidad, la relacionada con el vidrio y la relacionada con el ámbar, de modo que los cuerpos con electricidades del mismo tipo se repelen mientras que con distinto tipo se atraen [6].

Los avances que se realizaron en la comprensión de los fenómenos relacionados con la electricidad desde la época de los griegos hasta los comienzos del siglo XIX no fueron muchos. Stephen Gray (1670-1736, Fig. 1), tintorero de profesión, experimentador aficionado y colaborador de la *Royal Society*, descubrió que la electricidad se podía transmitir por un hilo metálico (a una distancia de unos 200 metros) y distinguió entre conductores y aislantes. Como en el caso del calor, la electricidad se concebía como un fluido que podía pasar de unos cuerpos a otros y, de hecho, aún hoy se habla de “fluido eléctrico” [1, 6].



Figura 1 - Experimento de Stephen Gray sobre la conducción de la electricidad.

Charles F. Dufay (1698-1739, Fig. 2), químico y administrador del Jardín del Rey, comprendió las distintas propiedades de la electricidad de distinto signo y supuso que existían dos clases de electricidad: la producida frotando sustancias vítreas como el cristal o la mica, y la producida por el ámbar frotado, el lacre, la vulcanita y otras sustancias resinosas [6]. Asignó a estas dos clases de electricidad unos fluidos eléctricos, uno denominado “vítreo” y el otro conocido como “resinoso” [9]. Se suponía que los cuerpos eléctricamente neutros contenían cantidades equilibradas de ambos fluidos eléctricos, mientras que los cuerpos cargados eléctricamente tenían un exceso de electricidad resinosa o vítrea. En 1734 Dufay estableció que “la característica de ambas electricidades es que un cuerpo cargado con electricidad vítrea repele a todos los demás cargados con la misma electricidad y, por el contrario, atrae a los que poseen electricidad resinosa” [1].



Figura 2 - Charles F. Dufay (1698-1739).

Por aquella época la electricidad se almacenaba en un dispositivo denominado botella de Leyden desarrollada por Pieter van Musschenbroek (1692-1761), profesor de matemáticas de la ciudad de Leyden (Holanda) [1, 6], a partir de un diseño realizado por Ewald Jurgen von Kleist en 1745 formado por una botella de cristal con agua sellada con un corcho a través del cual se introducía un clavo hasta tocar el agua. Para cargar eléctricamente la botella se acercaba la cabeza del clavo a la máquina de fricción. Cuando la botella estaba cargada, si se acercaba a la cabeza del clavo un cuerpo no electrificado saltaba una fuerte chispa entre ambos. Musschenbroek recubrió el interior y el exterior de la botella hasta la mitad con panes de plata,

de este modo el cristal de la botella hace el papel del aislante o dieléctrico del condensador [1, 2]. Si el pan exterior está conectado a tierra y el interior con un cuerpo electrificado, o viceversa, la electricidad (sea vítrea o resinosa) trata de escapar al suelo pero es detenida por la capa de cristal. Este dispositivo permitía acumular grandes cantidades de electricidad y se podían extraer chispas impresionantes conectando el interior y el exterior de la botella con un alambre (Fig. 3). La primitiva botella de Leyden se ha convertido hoy en varios tipos de condensadores [1, 6].



Figura 3 - Botella de Leyden.

Benjamin Franklin (1706-1790, Fig. 4) [1, 6], que comenzó a interesarse por la física a la edad de cuarenta años, concluyó que sólo existe un tipo de fluido eléctrico (la electricidad vítrea), en vez de dos como se admitía hasta entonces, y dos tipos de estados de electrificación, una como la del vidrio y otra como la del ámbar, y llamó a la primera positiva y a la segunda negativa. De este modo, si un cuerpo tiene exceso de fluido eléctrico aparece con electricidad positiva (vítreo), y si tiene defecto la tiene negativa (resinosa). Cuando dos cuerpos, uno de los cuales tiene un exceso y el otro una deficiencia de fluido eléctrico, se juntan, la corriente eléctrica debe fluir desde el primer cuerpo, donde está en exceso, al segundo, donde falta. En 1754 identificó el rayo como una descarga eléctrica después de enviar cometas a las nubes tormentosas para recoger electricidad de ellas y desde entonces se le conoce como el padre del pararrayos. La cuerda húmeda que sostenía la cometa servía como un perfecto conductor de la electricidad y con ella podían cargarse botellas de Leyden y obtener después chispas de ellas. Sus experimentos con el pararrayos y sus ideas políticas, opuestas a las monarquías absolutas, motivaron que en un busto suyo se escribiera que había “arrancado el rayo del cielo y el cetro del tirano” [6].

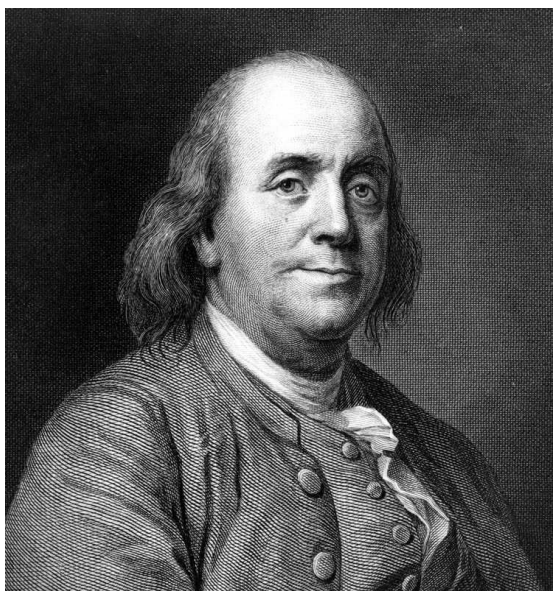


Figura 4 - Benjamin Franklin (1706-1790).

Henry Cavendish (1731-1810, Fig. 5), hombre extremadamente rico y extremadamente tímido y un personaje ciertamente solitario, fue uno de los primeros en utilizar el concepto de carga eléctrica [6]. Hizo muchos experimentos y descubrimientos entre 1760 y 1800 como la medida de la capacidad de un condensador o el concepto de resistencia y desde luego fue uno de los científicos experimentales más grandes que han existido jamás. Sin embargo, sólo publicó dos artículos sobre electricidad y dejó veinte paquetes de manuscritos que quedaron en manos de sus parientes y no fueron conocidos hasta que, más de medio siglo después de la muerte de Cavendish, James Clerk Maxwell, por entonces director del laboratorio Cavendish de la Universidad de Cambridge, los puso en orden y los publicó en 1879 [4, 6].



Figura 5 - Henry Cavendish (1731-1810).

La ley que rige las fuerzas de atracción y repulsión entre cargas eléctricas fue descubierta y formulada en 1785 por Charles Augustin Coulomb (1736-1806, Fig. 6) tras una serie de experimentos realizados con una balanza de torsión de gran sensibilidad (Fig. 7) formada por una varilla ligera que está suspendida de un largo y delgado hilo con dos esferas equilibradas a cada extremo [6, 8]. Según la ley de Coulomb, la fuerza entre dos cargas puntuales es proporcional al producto de sus cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Esta fuerza es atractiva si las cargas son de distinto signo y repulsiva si el signo de las dos cargas es el mismo.



Figura 6 - Charles Augustin Coulomb (1736-1806).

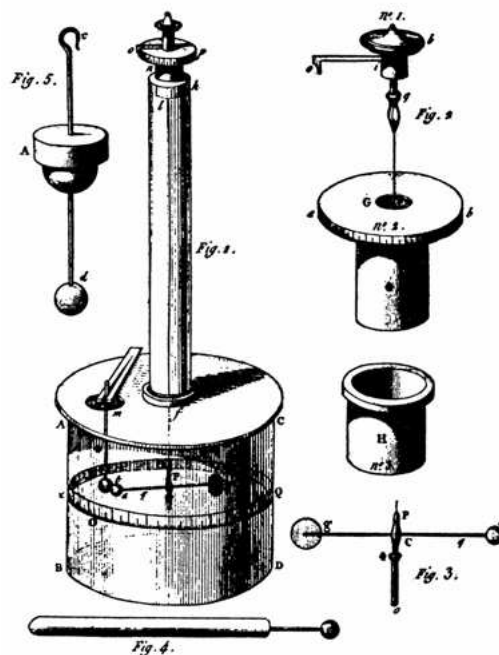


Figura 7 - Esquema de la balanza de torsión utilizada por Coulomb.

Siméon Denis Poisson (1781-1840, Fig. 8) [6], alumno de la Escuela Politécnica de París donde tuvo de profesores a Laplace y Lagrange y donde él mismo fue más tarde profesor, fue el primero en aplicar a la electricidad las ideas de Pierre Simon de Laplace (1749-1827) sobre el potencial gravitatorio. Introdujo el concepto de “potencial eléctrico” y en 1811 lo aplicó a la distribución de electricidad sobre una superficie en su obra “Memoria sobre la distribución de la electricidad sobre la superficie de los cuerpos conductores”. Poisson siguió pensando en términos de dos fluidos eléctricos aunque realmente estaba más interesado en la formalización matemática de las fuerzas entre cuerpos electrificados que la explicación física de los dos fluidos [6].



Figura 8 - Siméon Denis Poisson (1781-1840).

A pesar de los avances realizados en la comprensión de los fenómenos eléctricos, durante todo el siglo XVIII la única fuente de electricidad eran las máquinas electrostática de rotación, tales como las construidas por Otto von Guericke (1602-1686) [1, 6], que producían electricidad estática por frotamiento y sólo eran capaces de suministrar descargas transitorias, lo que dificultaba el avance del estudio de la electricidad. Era necesario, sin embargo, descubrir la forma de obtener un suministro estable y continuo de electricidad, es decir, de producir corriente eléctrica.

El precursor del descubrimiento de la corriente eléctrica continua fue el médico italiano Luigi Galvani (1737-1798, Fig. 9) [6] que estudió el efecto de la electricidad sobre los animales, siendo famosos sus experimentos con ancas de ranas realizados con máquinas eléctricas y botellas de Leyden (Fig. 10). Galvani realizó un experimento, fechado el 20 de septiembre de 1786 en el diario de su laboratorio, en el cual empleaba una horquilla con un diente de cobre y otro de hierro

con los cuales tocaba el nervio y el músculo del anca de una rana, la cual se contraía rápidamente a cada toque [6].



Figura 9 - Luigi Galvani (1737-1798).

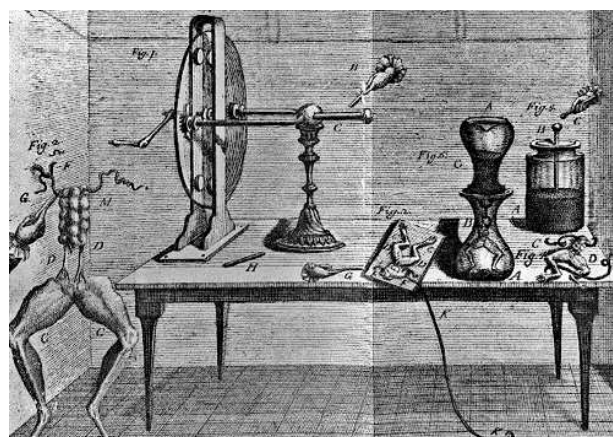


Figura 10 - Experiencias de Galvani con ancas de rana.

Sin embargo, fue el también italiano Alessandro G. Volta (1745-1827, Fig. 11) [1, 6] quien interpretó que los dos metales juntos (hierro y cobre) de los experimentos de Galvani producían la corriente eléctrica después de sumergirlos en una solución salina y las ancas de rana sólo reaccionaban ante ella. Volta llamó “galvanismo” a este fenómeno y hacia 1800 fue capaz de producir una corriente eléctrica con una pila de discos de estaño o zinc y cobre o plata alternados y separados por otros de cartón impregnados de una solución de sal (Fig. 12). De esta pila de disco es de donde proviene el nombre de “pila” voltaica que se ha generalizado para designar a las baterías eléctricas de este tipo. Napoleón se interesó mucho por los descubrimientos de Volta y mandó construir una gran pila voltaica en la Escuela Politécnica de París [1, 6, 10].

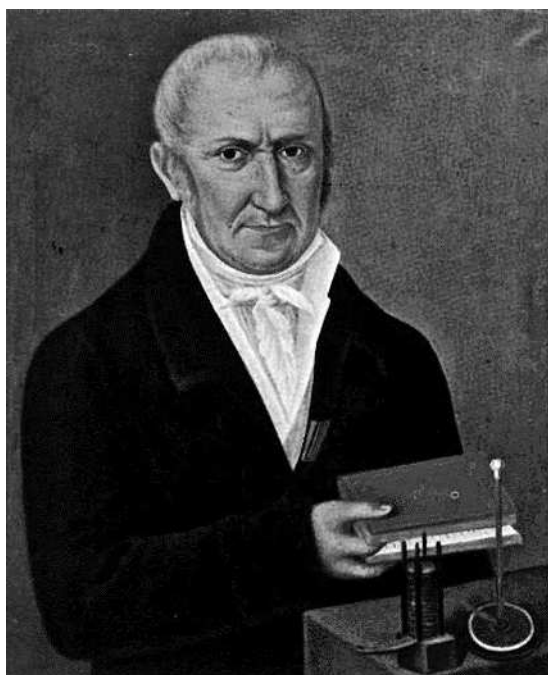


Figura 11 - Alessandro G. Volta (1745-1827).



Figura 13 - Humphry Davy (1778-1829).

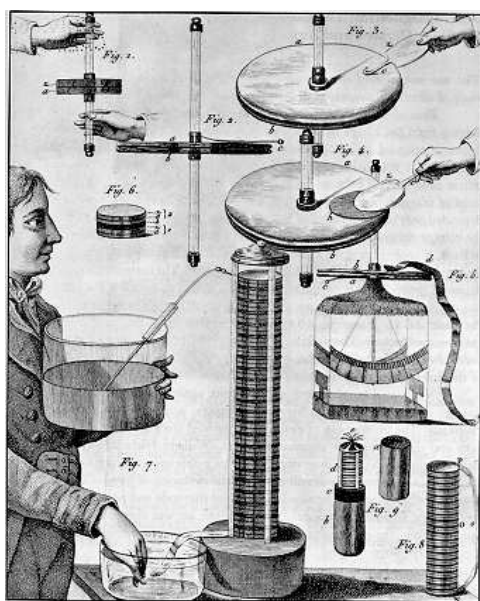


Figura 12 - Pila voltaica.

Humphry Davy (1778-1829, Fig. 13), científico de la *Royal Institution* de Londres, explicó en 1807 que el proceso generador de la electricidad lo constituyen los cambios químicos en la pila. Davy utilizó la pila de Volta para separar metales introduciendo los electrodos en disoluciones de sales, iniciando el proceso de electrolisis. Como anécdota señalar que ante la pregunta de cuál había sido su mayor descubrimiento, las respuesta de Davy fue “mi mayor descubrimiento ha sido Michael Faraday” [2, 6]. Precisamente Faraday, trabajando con Davy, descubrió las leyes de la electrolisis.

Georg Simon Ohm (1878-1854) [6] aplicó al fenómeno de la electricidad por un alambre algunos descubrimientos hechos por Fourier sobre la propagación del calor, mediante una analogía entre la corriente eléctrica y la transmisión del calor. Obtuvo la relación entre diferencia de potencial, intensidad de corriente y resistencia conocida como ley de Ohm. Publicó sus resultados en un artículo titulado “el circuito galvánico investigado matemáticamente” y publicado en 1827. Sin embargo, su trabajo tuvo una mala acogida y hubo que esperar para que fuera reconocido hasta 1845, año en el que Gustav R. Kirchhoff (1824-1887) [6], siendo estudiante en Königsberg, formuló las dos leyes de los circuitos que llevan su nombre: la ley de los nudos, relacionada con la conservación de la carga eléctrica, y la ley de las mallas, relacionada con la conservación de la energía.

2.2. Magnetismo [1, 6]

Como sucede con la electricidad, el fenómeno del magnetismo era conocido desde la antigua Grecia y también su nombre es de origen griego. La palabra magnetismo viene de la palabra “magnes”, imán en griego, que a su vez viene de Magnesia, región del Asia Menor en la que se encuentran yacimientos del mineral magnetita (piedra imán), que tiene la propiedad de atraer objetos de hierro así como conferir al hierro sus propiedades magnéticas. Se observó que el efecto de atraer pequeños trocitos de hierro era más pronunciado en ciertas zonas del imán llamadas polos magnéticos [6, 8].

En 1269, Pierre de Maricourt [1], ingeniero militar al servicio de Carlos de Anjou y compañero de San Luis

en la primera cruzada, descubrió que si una aguja imantada se deja libremente en distintas posiciones sobre un imán natural esférico, se orienta a lo largo de líneas que, rodeando el imán, pasan por puntos situados en extremos opuestos a la esfera. Estos puntos fueron llamados polos del imán. También observó que los polos iguales de dos imanes se repelen entre sí y los polos distintos se atraen mutuamente. La carta dirigida en 1269 a un amigo (*Epístola de magnete*) supone el primer tratado científico sobre las propiedades del imán [1].

La utilización de una aguja imantada como brújula en navegación se remonta a la Edad Media aunque el conocimiento de las propiedades de la brújula ya era conocido por los chinos varios siglos antes y llevado a occidente por los árabes. Si una varilla imantada se suspende libremente en un punto de la superficie de la Tierra, la varilla se orienta en la dirección Norte-Sur [3]. Este hecho permitió distinguir los extremos de la varilla o polos magnéticos norte (N) y sur (S) y concluir que la propia Tierra se comporta como un gran imán. Se observó, asimismo, que la fuerza entre polos del mismo nombre es repulsiva, mientras que la fuerza entre polos de distinto nombre es atractiva. A diferencia de lo que sucede con las cargas eléctricas los polos magnéticos siempre se presentan de dos en dos. No es posible tener un polo norte o un polo sur aislados y si se parte un imán para intentar separar sus polos, se obtienen dos imanes, cada uno de ellos con una pareja de polos norte y sur de igual intensidad. De estos experimentos se puede concluir que no existen monopolos magnéticos libres o que, al menos, hasta el momento no han sido encontrados.

William Gilbert (1544-1603, Fig. 14) [1, 5, 6], contemporáneo de Kepler y Galileo, llevó a cabo cuidadosos estudios de las interacciones magnéticas y publicó sus resultados en un libro, *De Magnete* - la primera descripción exhaustiva del magnetismo, publicada en 1600. Gilbert estudió medicina y llegó a ser un médico de prestigio y en el año 1600 fue nombrado médico personal de la reina Isabel I de Inglaterra, aunque no debió ser muy bueno en ese cometido pues la reina falleció casi inmediatamente. El único legado personal que dejó la reina antes de morir fue una suma de dinero para William Gilbert con la cual éste pudo continuar sus estudios sobre magnetismo. En sus estudios Gilbert concluyó que la Tierra puede considerarse como un imán gigante con sus polos situados cerca de los polos norte y sur geográficos.

El magnetismo era uno de los ejemplos preferidos de los magos para probar la existencia de cualidades ocultas. Gilbert llegó a comparar los efectos de los imanes con los del alma, mientras que para René Descartes (1596-1650, Fig. 15) [5, 6] el magnetismo era un torrente de corpúsculos que salían del cuerpo magnético y que tenían forma de tornillos de rosca derecha o izquierda, por lo que, dependiendo de la forma, harían que los objetos a los que se acercaran se movieran ha-

cia el imán o se alejaran del mismo [1, 6].



Figura 14 - William Gilbert (1544-1603).



Figura 15 - René Descartes (1596-1650).

En el siglo XVIII, por analogía con la electricidad, se supuso la existencia de dos fluidos magnéticos. Coulomb estudió las fuerzas entre polos magnéticos y propuso la ecuación de la fuerza entre polos magnéticos semejante a la fuerza electrostática entre cargas eléctricas y la fuerza gravitatoria entre masas gravitatorias. La ley que rige las fuerzas de atracción y repulsión entre las cargas eléctricas y los polos magnéticos fue publicada en 1785 en un trabajo titulado “Segunda memoria sobre la electricidad y el magnetismo” [1, 6]. Como había hecho Gilbert casi doscientos años antes y Tales de Mileto dos mil años antes, Coulomb consideró que

los fenómenos eléctricos y magnéticos eran diferentes, puesto que, a pesar de la estrecha analogía que parecía existir entre ellos, los experimentos indicaban que los polos magnéticos y las cargas eléctricas (entonces sólo en reposo) no interactuaban entre sí. Una de las figuras claves en el desarrollo del magnetismo (y en el de otros muchos campos de la ciencia) es Karl Friedrich Gauss (1777-1855, Fig. 16) que estableció el primer Observatorio Magnético en Gotinga e inició en él observaciones continuas sobre el magnetismo terrestre y desarrolló en 1832 el primer magnetómetro [6].



Figura 16 - Karl Friedrich Gauss (1777-1855).

2.3. Óptica [6, 14]

En la antigua Grecia se consideraba a la luz como una emisión de los cuerpos luminosos, aunque había cierta confusión sobre si el rayo de luz partía del ojo o del cuerpo iluminado [6]. Los filósofos griegos como Pitágoras, Demócrito, Empedócles, Platón o Aristóteles desarrollaron varias teorías de la naturaleza de la luz, la de este último muy similar a la teoría del éter del siglo XIX [6, 8, 11]. Con Euclides y otros autores griegos se formaliza y aplica la geometría a las leyes de la óptica, independientemente de sus ideas sobre la naturaleza de la luz. Durante la Edad Media, en Occidente se recibe el legado de la óptica de la antigua Grecia y de los autores árabes, el más importante de ellos Alhazen, quien trabajó en la ley de la reflexión, poniendo los ángulos de incidencia y de reflexión en el mismo plano normal a la interfase. Alhazen también estudió los espejos esféricos y parabólicos y dio una descripción detallada del ojo humano [6, 14].

Con los autores modernos se divide la consideración de la naturaleza de la luz en dos corrientes: ondulatoria y corpuscular [6]. En la defensa de la naturaleza ondulatoria de la luz destacan figuras como Christian Huygens

(1629-1695, Fig. 17) y Robert Hooke (1635-1703, Fig. 18) [11] que consideran la luz como un fenómeno ondulatorio semejante al sonido. Todas las ondas conocidas hasta entonces eran ondas mecánicas y necesitaban, por tanto, de un medio material para su propagación. Como la luz atraviesa el vacío, el medio en el que se propagan las ondas luminosas no puede ser el aire, como en el caso del sonido, sino que se postuló un medio como un fluido muy sutil llamado éter luminoso, cuyas vibraciones constituyen la luz. El éter se remonta a las ideas griegas y medievales sobre la naturaleza de los cuerpos celestes [6, 8].



Figura 17 - Christian Huygens (1629-1695).



Figura 18 - Robert Hooke (1635-1703).

En la defensa de la naturaleza corpuscular de la luz destaca fundamentalmente Isaac Newton (1643-1727, Fig. 19), hijo de un próspero pequeño terrateniente de

Lincolnshire [5, 6]. Newton estudió en la escuela primaria local antes de ingresar en el *Trinity College* de Cambridge [6]. Era docente del *Trinity* cuando escribió los dos libros que le dieron fama: los *Principia*, publicados en 1687, y el *Opticks* (Fig. 20), que vio la luz finalmente en 1704, después de su nombramiento como presidente de la *Royal Society*, tras la muerte de Robert Hooke [6]. En su libro *Opticks* empieza exponiendo la teoría de los colores que había elaborado varias décadas antes e introduce a continuación diversas dudas en las que incluye su parecer sobre diversas cuestiones de filosofía natural, como la naturaleza de la luz, las causas de los fenómenos eléctricos y magnéticos o la posible existencia de un éter universal que llenara el espacio [6]. Newton considera la luz formada por partículas luminosas emitidas por los cuerpos. Desde los tiempos de Newton hasta los primeros años del siglo XIX, la teoría corpuscular de la luz gozó del favor de la mayor parte de los físicos, fundamentalmente por la autoridad de Newton. De hecho, el gran peso que tenía su opinión cayó como una losa sobre la teoría ondulatoria durante el siglo XVIII, aplastando a sus partidarios [14].

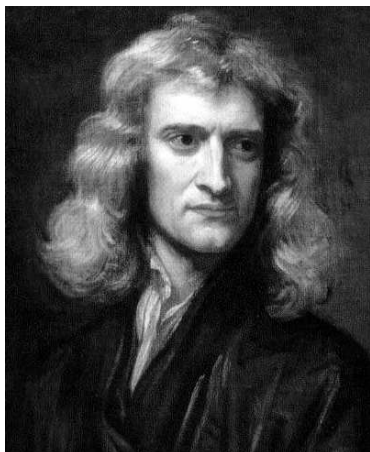


Figura 19 - Isaac Newton (1643-1727).

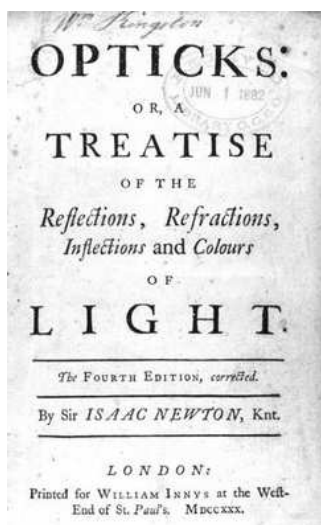


Figura 20 - Portada del *Opticks* de Newton.

La naturaleza ondulatoria de la luz, demostrada de forma convincente hacia 1801 por un médico inglés llamado Thomas Young (1773-1829, Fig. 21) con uno de los “experimentos más bellos de la física”, el de la doble rendija [11-13]. Paradójicamente, Young era mucho más popular, por lo menos en Inglaterra, por descifrar los jeroglíficos egipcios de la *piedra Rosetta* (aunque sus trabajos eran más limitados y primitivos comparados con los de Champollion en Francia) [5, 12, 13] que por desentrañar la naturaleza de la luz. Su mente independiente y tenaz le ayudó a probar la naturaleza ondulatoria de la luz en contraposición a la naturaleza corpuscular [12, 13].

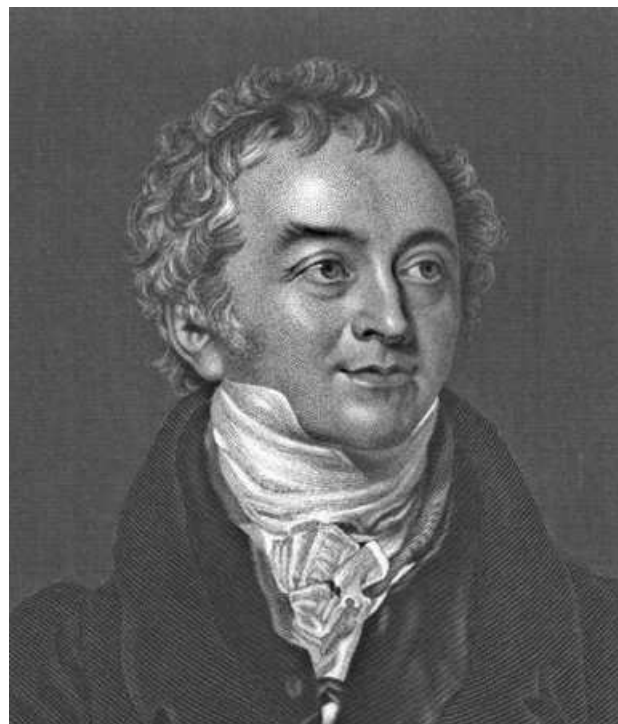


Figura 21 - Thomas Young (1773-1829).

Entre los años 1801 y 1803 Young presentó unos artículos ante la *Royal Society* exaltando la teoría ondulatoria de la luz y añadiendo a ella un nuevo concepto fundamental, el llamado *principio de interferencia* [14]. Cuando se superponen las ondas provenientes de dos fuentes luminosas puntuales, sobre una pantalla colocada paralela a la línea de unión de los dos orificios, se producen franjas claras y oscuras regularmente espaciadas. Éste es el primer experimento en el que se demuestra que la superposición de luz puede producir oscuridad. Este fenómeno se conoce como interferencia y con este experimento se corroboraron las ideas intuitivas de Huygens respecto al carácter ondulatorio de la luz [12, 14].

Ettiène Louis Malus (1775-1812), ingeniero militar de Napoleón, descubrió en 1808 el fenómeno de la polarización de la luz [6]. Observó que, mirando a través de un cristal de espato de Islandia, la luz procedente de la reflexión en una ventana no producía la doble refracción

(birrefringencia) típica de este material y girando el cristal en ciertas posiciones la luz disminuía. Sin embargo, Malus intentó explicar este fenómeno desde el punto de vista de la teoría corpuscular de la luz que seguía manteniendo [6, 11].

Del mismo modo que Young es el responsable del resurgimiento de la teoría ondulatoria de la luz en Inglaterra gracias a sus experimentos sobre interferencias con ondas luminosas, Augustin Jean Fresnel (1778-1827, Fig. 22) comenzó a revivir de manera brillante la teoría ondulatoria en Francia, ajeno en un principio a los esfuerzos realizados por Young varios años antes [6].



Figura 22 - Augustin J. Fresnel (1778-1827).

Fresnel sintetizó los conceptos de la teoría ondulatoria de Huygens y el principio de interferencia y analizó el fenómeno de la difracción, característico del movimiento ondulatorio, que se presenta cuando una onda es distorsionada por un obstáculo. Éste puede ser una pantalla con una pequeña abertura, una ranura que sólo permite el paso de una pequeña fracción de la onda incidente o un objeto pequeño que bloquea el paso de una parte del frente de onda. En realidad no hay distinción física significativa entre interferencia y difracción, pero es algo común, aunque no siempre apropiado, hablar de interferencia cuando se analiza la superposición de solamente unas pocas ondas y de difracción cuando se trata de un gran número de ondas. A pesar de ello, es habitual referirse, por ejemplo, a la interferencia de haces múltiples en un contexto y a la difracción por una red en otro [14]. El principio de Huygens-Fresnel permite calcular los patrones de difracción generados por obstáculos y aberturas y explicar de forma satisfactoria la propagación rectilínea en medios homogéneos, eliminando así la objeción principal de Newton para la teoría

ondulatoria. Puede decirse que este principio lleva a la siguiente conclusión: “la luz se difracta y la interferencia está en el corazón del proceso” [14]. Fresnel también estudió el fenómeno de la polarización, comprobando que dos luces cuyas polarizaciones son perpendiculares no interfieren, por lo que concluyó que la luz era una onda transversal. Al tratarse la luz de una onda transversal, el éter no podía ser un fluido sino que tendría que tener las propiedades de un sólido elástico de elevada rigidez. Esta idea parecía contraponerse a la de su enorme sutileza, que permite a todos los cuerpos moverse a través de él. De esta forma el éter luminoso presentaba propiedades físicas contradictorias [4-6].

A mediados del siglo XIX Armand Fizeau (1819-1896) encontró un valor de la velocidad de la luz igual a 315.000 km/s, mientras que Jean Bernard Foucault (1819-1868), midió la velocidad de la luz en dos medios distintos, aire y agua, demostrando que en aire es mayor que en agua, en contra de lo que se deducía de la corpuscular de Newton [6]. Foucault obtuvo en 1862 una de las primeras determinaciones de gran exactitud de la velocidad de la luz utilizando un aparato formado por espejos en rotación. Poco a poco, los argumentos a favor de la teoría ondulatoria de la luz terminaron por lograr su aceptación universal [6].

3. Oersted y Ampère: los orígenes del electromagnetismo

3.1. Oersted: acción de una corriente sobre un imán [1, 6]

Hans Christian Oersted (1777-1851, Fig. 23) nació en Rudkøbing, Dinamarca, y estudió filosofía natural (física) en la Universidad de Copenhague en la que se convirtió en un apasionado defensor de los puntos de vista filosóficos de Kant sobre los que versó su propia tesis doctoral [1]. Desde 1806 y durante cincuenta años fue Catedrático de Física y Química de la Universidad de Copenhague. La invención en 1800 de la pila eléctrica por Volta hizo entrar en ebullición al mundo científico al hacer posible trabajar con fuentes permanentes de “fluido eléctrico” [1]. Oersted se interesó desde el primer momento por el “galvanismo” y su relación con la química y ya en el año 1801 empezó a realizar experimentos con una pila voltaica. Su contribución más importante al electromagnetismo fue su descubrimiento en 1820 de que el paso de una corriente eléctrica desviaba una aguja imantada situada en su cercanía. Había descubierto que una corriente eléctrica produce efectos magnéticos. La inspiración original de sus experimentos fue la convicción metafísica de la unidad de todas las fuerzas de la Naturaleza, que él deducía de los “filósofos de la Naturaleza” alemanes, en particular de Friedrich Schelling [1]. Partiendo de esta perspectiva, Oersted estaba convencido de que en la naturaleza debía existir un vínculo entre electricidad y

magnetismo; sólo era cuestión de encontrarlo [1].



Figura 23 - Hans Christian Oersted (1777-1851).

Su famoso experimento es muy sencillo [15]. Situó una aguja imantada libremente de modo que ésta se orientaba en la dirección norte-sur. A continuación colocó un cable eléctrico sobre la aguja y, por tanto, en la misma dirección. Este cable lo conectó a una pila eléctrica y al cerrar el circuito comprobó que la aguja de la brújula se desviaba de su dirección original situándose perpendicular al cable, es decir, en la dirección este-oeste. Si la corriente eléctrica era capaz de hacer girar la aguja de la brújula, Oersted concluyó que dicha corriente eléctrica produce efectos magnéticos, que la electricidad y el magnetismo no son fenómenos independientes, sino que están relacionados y acuñó el término electromagnetismo para designar a la parte de la física que englobaría desde entonces a ambos fenómenos [1]. Los resultados aparecieron publicados en un breve artículo, en latín, que envió a las principales revistas científicas europeas y que está fechado el 21 de julio de 1820. A lo largo de los años se ha propagado la historia de que su descubrimiento se había producido de forma fortuita, casi por azar, cuando realizaba experiencias con una corriente eléctrica en clase con sus alumnos y vio que dicha corriente hacía girar la aguja de una brújula que tenía en la misma mesa [1]. Esta versión tiene su origen en una carta que envió uno de sus discípulos a Faraday en 1857, es decir, casi cuarenta años después del descubrimiento de Oersted. En cualquier caso, la observación realizada en 1820 era el resultado de una larga reflexión sobre las fuerzas eléctricas y magnéticas y, como señala Lagrange a propósito de Newton, “tales accidentes ocurren sólo a quienes los provocan” [1].

El papel de Oersted como profesor, conferenciante y escritor tuvo para el pueblo danés una importancia similar a la de su descubrimiento del electromagnetismo [1]. En los cincuenta años que estuvo como profesor en la Universidad de Copenhague su labor sirvió de inspiración a sus alumnos, científicos e ingenieros, y contribuyó al desarrollo científico, cultural e industrial de Dinamarca. Prácticamente sólo elevó el nivel de la ciencia danesa a la altura de las principales naciones europeas y, aunque envuelve una cierta “licencia poética”, su influencia en el desarrollo de la Física en su país tuvo una cierta responsabilidad en que luego surgieran en Dinamarca figuras de la talla de Niels Bohr [1].

3.2. Ampère: acciones entre corrientes [1, 6]

André Marie Ampère (1775-1836, Fig. 24) fue un niño prodigio educado bajo la influencia del filósofo Rousseau, estudió privadamente y su vida fue, en el terreno personal, ciertamente tormentosa [1]. Sus primeros años estuvieron marcados por la Revolución Francesa. Su padre, comerciante de sedas, acabó de juez de paz en la ciudad de Lyon y tuvo que juzgar y sentenciar a un líder jacobino a morir en la guillotina. Años después, cuando llegaron los jacobinos al poder, el padre de Ampère fue juzgado y condenado también a morir en la guillotina el 24 de noviembre de 1793, cuando André Marie contaba con dieciocho años de edad. Este hecho afectó profundamente a Ampère que, tras la muerte de su padre, tuvo una fuerte depresión durante un año y los años siguientes los pasó deambulando por la campiña francesa tratando de construir una lengua universal a partir del latín y el griego, y escribiendo poesía. En esos años estudiaba ciencia sólo por el placer de aprender y desarrolló una gran habilidad manual que en el futuro le serviría para realizar sus conocidos experimentos [1].



Figura 24 - André Marie Ampère (1775-1836).

Durante varios años fue profesor de física y química en colegios de enseñanza secundaria y por fin, en 1804, consigue una plaza de profesor en la Escuela Politécnica

de París consiguiendo entrar en la Academia de Ciencias francesa en 1814. Desde la infancia mostró grandes cualidades para las matemáticas y sus primeras inquietudes científicas fueron, precisamente, para las matemáticas [1]. Ampère también se paseó por la química y por la óptica y puede calificarse como casi un buen químico. Casi descubre el cloro, casi descubre el yodo y casi descubre la ley de Avogadro, enunciada tres años después por Ampère sin conocerla. De hecho, en Francia a veces se la denomina ley de Ampère-Avogadro. Su interés por la óptica se debe a su amistad con Fresnel y mantuvo la esperanza de que el éter luminoso de Fresnel podría ser el medio de transmisión de los efectos electrodinámicos en los que fue el primer atisbo de la relación entre la óptica, la electricidad y el magnetismo, y auténtica avanzadilla de lo que vendría después. Sin embargo su contribución más importante la realizó en el campo del electromagnetismo [1].

A diferencia de otros científicos franceses que pensaban que los grandes descubrimientos sólo podían realizarse en Francia y que, por tanto, veían con indiferencia el experimento de Oersted e incluso señalaban “¿cómo una cosa tan importante podía haberse descubierto en Copenhague?” [1], Ampère desarrolló las consecuencias del experimento de Oersted que hasta entonces era un gran descubrimiento, pero nada más. A partir de dicho experimento desarrolló la teoría matemática que explica la interacción entre la electricidad y el magnetismo denominada electrodinámica, afirmando que los fenómenos magnéticos dependen sólo de la existencia y del movimiento de cargas eléctricas. Ampère concluyó que mientras que la carga eléctrica es una realidad fundamental, no existen cargas magnéticas aisladas. Definitivamente, Ampère fue un genio y otro genio del siglo XIX, James Clerk Maxwell, llegó a denominar a Ampère con gran admiración “el Newton de la electricidad” [1, 2, 16].

Durante el verano de 1820 repitió el experimento de Oersted y llegó a la conclusión de que si una corriente eléctrica produce efectos magnéticos sobre una varilla imantada porque no podría producir efectos magnéticos sobre otra corriente. En otoño de ese mismo año publicó los resultados de su famosa experiencia en la que dos corrientes eléctricas paralelas se atraen o se repelen en función de si los sentidos de sus corrientes son iguales o distintos, respectivamente. En 1827 se publica su libro “La teoría matemática de los fenómenos electrodinámicos deducida únicamente de la experiencia” [1], obra clásica de la historia de la física y verdadero testimonio de la gran contribución realizada por Ampère desde 1820 en el campo del electromagnetismo. En este libro, a partir de una serie de experimentos muy ingeniosos trata de evidenciar que “el magnetismo es electricidad en movimiento” [1]. También explica la existencia de imanes permanentes aportando la idea de que el magnetismo natural está producido por pequeñas corrientes a nivel molecular: las “corrientes amperianas”.

De este modo todos los efectos magnéticos son debidos al movimiento de cargas eléctricas, bien sea a nivel macroscópico como a microscópico. En 1822 inventa el solenoide y estudia la interacción mutua entre parejas de solenoides y llega a la conclusión de que el comportamiento de un solenoide es análogo al de un imán recto, una prueba más de las relaciones entre el magnetismo de los imanes con las acciones magnéticas de las corrientes eléctricas [1].

Jean-Baptiste Biot (1774-1862) y Felix Savart (1791-1841), profesores de física en el Colegio de Francia, recibieron, lo mismo que Ampère, la noticia del descubrimiento de Oersted, y ese mismo año de 1820 presentaron en la Academia sus experiencias que ponían de manifiesto que un hilo conductor muy largo, teóricamente infinito, recorrido por una corriente eléctrica produce en cualquier punto del espacio un efecto inversamente proporcional a su distancia al hilo [1, 6]. La generalización de este hecho se conoce en la actualidad con el nombre de Ley de Biot-Savart y constituye una ley básica del magnetismo.

Aunque es menos conocido, Ampère también participó en el descubrimiento de la inducción electromagnética y en sus primeras aplicaciones. Ampère y Faraday intercambiaron una intensa correspondencia, no exenta de polémica, en relación a los fenómenos de inducción electromagnética, es decir, en la generación de corrientes eléctricas por medio de campos magnéticos [1, 2]. Sin embargo, Faraday carecía de formación matemática y no podía seguir los desarrollos teóricos de Ampère, por lo que desconfiaba de sus resultados, lo cual no impidió una gran colaboración entre ambos. En 1822 Ampère estuvo ante un fenómeno de inducción electromagnética, y años después, tras el descubrimiento de Faraday de 1831, se lamentó de no haber prestado más atención a los resultados experimentales. Finalmente escribió a Faraday felicitándole por su descubrimiento [1].

4. Faraday: inducción electromagnética, campos y líneas de fuerza [2, 6]

El caso de Faraday no es frecuente en la historia de la física: su formación matemática era muy elemental; sin embargo, las leyes de la electricidad y el magnetismo son debidas mucho más a los descubrimientos experimentales de Faraday que a los de cualquier otra persona. Él descubrió la inducción electromagnética, la cual le llevó a la invención de la dinamo, precursora del generador eléctrico, explicó la electrolisis en términos de fuerzas eléctricas e introdujo conceptos, como las nociones de “líneas de fuerza” y de “campo”, fundamentales en la comprensión de las interacciones eléctricas y magnéticas y piezas básicas en el desarrollo posterior de la física [2, 6]. Michael Faraday (1791-1867, Fig. 25) [2] nació en Newington, al sur de Londres, en el seno de una familia humilde. La única educación formal que

recibió de pequeño fue en lectura, escritura y aritmética y abandonó la escuela a los trece años para trabajar en un taller de encuadernación, donde desarrolló un insaciable apetito por la lectura. Comenzó como recadero y vendedor de periódicos, pero pronto ascendió a aprendiz de encuadernador, actividad en la que mostró gran capacidad y habilidad. Algunos de los libros encuadernados por Faraday todavía se conservan [2].

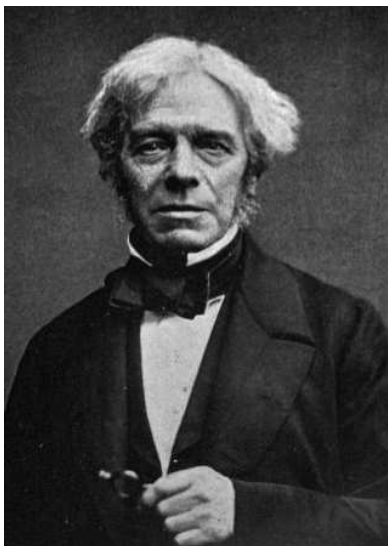


Figura 25 - Michael Faraday (1791-1867).

Su pasión por la ciencia despertó tras la lectura de la voz “electricidad” de la “Enciclopedia Británica” de Tytler cuando la estaba encuadernando, tras lo cual comenzó a hacer experimentos en un laboratorio improvisado [2]. En 1813 fue contratado como ayudante de laboratorio de Humphry Davy en la *Royal Institution* de Londres, de la que fue elegido miembro en 1824 y donde trabajó hasta su muerte en 1867. Faraday fue también un gran divulgador de la ciencia y en 1826 inició en la *Royal Institution* las “Charlas vespertinas de los viernes”, que aun perduran y son un canal de comunicación entre científicos y profanos, y al año siguiente las “Conferencias juveniles de Navidad” (*Christmas lectures*) [2].

El primer descubrimiento de Faraday sobre electromagnetismo fue realizado en 1821. Al repetir el experimento de Oersted con una aguja magnética en diversos puntos alrededor de un hilo conductor de una corriente, Faraday comprobó que la fuerza ejercida por las corriente sobre el imán era de naturaleza circular. Como expresó años después el hilo estaba rodeado por una serie infinita de “líneas de fuerza” circulares y concéntricas, con lo que un polo magnético que pudiera moverse libremente, experimentaría un impulso según una trayectoria circular alrededor del conductor. El conjunto de estas líneas de fuerza se denomina campo magnético de la corriente, término introducido por el mismo [2]. Faraday partió de los trabajos de Oersted y Ampère sobre las propiedades magnéticas de las corrientes eléctricas

y en 1831 consiguió producir una corriente eléctrica a partir de una acción magnética, fenómeno que se conoce como inducción electromagnética. Muchos físicos habían pensado antes que el magnetismo debía poder transformarse en electricidad, pero no habían encontrado la manera de lograrlo [2]. El éxito de Faraday demostró su dominio de la técnica experimental. Faraday empezó a trabajar en 1821, justo después del experimento de Oersted y en 1831 comprobó que cuando se hacía pasar una corriente eléctrica por una bobina, se generaba otra corriente de muy corta duración en otra bobina cercana. El descubrimiento de la inducción electromagnética en 1831 marcó un hito decisivo en el progreso no sólo de la ciencia sino de la sociedad y revela algo nuevo sobre los campos eléctricos y magnéticos [2, 6]. A diferencia de los campos electrostáticos creados por cargas eléctricas en reposo cuya circulación a lo largo de una línea cerrada es nula (campo conservativo), los campos eléctricos creados por campos magnéticos tienen una circulación a lo largo de una línea cerrada distinta de cero. Dicha circulación, que corresponde a la fuerza electromotriz inducida, es igual al ritmo de cambio del flujo del campo magnético que atraviesa la superficie delimitada por dicha línea cerrada (ley de Faraday).

Faraday inventó el primer motor eléctrico, el primer transformador, el primer generador eléctrico y la primera dinamo, por lo que Faraday puede ser llamado, sin género de dudas, el padre de la electrotecnia [2, 3]. En la Fig. 26 se muestran dos versiones del “rotor electromagnético de Faraday” [8]. En cada una de ellas la copa de vidrio está llena de mercurio, de modo que una corriente eléctrica puede pasar del alambre superior a la base. A la izquierda, el polo sur de un imán está fijo y el polo norte puede girar libremente a lo largo de una de las líneas de fuerza magnética circulares que rodean la corriente. A la derecha la varilla metálica que transporta la corriente gira alrededor del imán que permanece fijo. Parecía que se podía usar la electricidad y el magnetismo combinados con el fin de generar fuerza motriz.

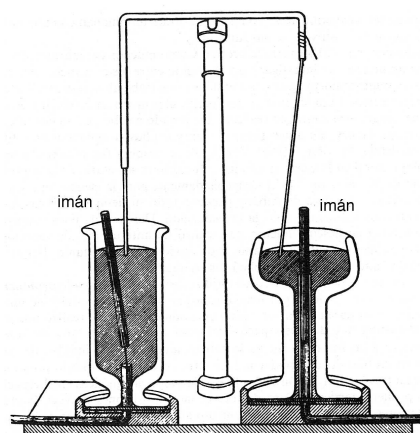


Figura 26 - Rotor electromagnético de Faraday [8].

Otro de los efectos descubiertos por Faraday, quizás menos conocidos, es el de la influencia de un campo magnético sobre un haz de luz polarizada, fenómeno conocido como efecto Faraday o efecto magneto-óptico (1845) [2, 6, 14]. Comprobó que si un haz de luz polarizado linealmente atraviesa un cierto material al que se aplica un campo magnético en la dirección de propagación de la luz, se observa un giro en el plano de polarización de la luz y que ese ángulo girado es proporcional al campo magnético aplicado y a la distancia recorrida por la luz dentro del material. Se trata, desde luego, de la primera indicación evidente de que la fuerza magnética y la luz estaban relacionadas entre sí y demostraba que el fenómeno de la luz se relacionaba con la electricidad y el magnetismo. Faraday llegó a escribir en relación a este fenómeno que “este hecho probablemente será sumamente fecundo y de gran valor en la investigación de ambas clases de fuerzas naturales” [2].

Abandonó la teoría de los fluidos para explicar la electricidad y el magnetismo y propuso los conceptos modernos de “campo electromagnético” y “líneas de campo” de los campos eléctricos y magnéticos, que llenan el espacio en torno a cargas eléctricas, imanes y corrientes eléctricas [3]. De este modo, se apartaba de la teoría newtoniana de la acción a distancia mantenida entre otros por Coulomb y Ampère [6]. Sin embargo, hubo que esperar varios años hasta la aceptación de las líneas de campo de Faraday, justo hasta que Maxwell entró en escena, con la publicación de su artículo “Sobre las líneas de fuerza de Faraday” en 1856. Con Faraday la interacción entre imanes y corrientes se convierte en el motor del cambio social y del “gran cambio” [2] con el que calificó Einstein la incorporación del concepto de campo al desarrollo de la física. Del mismo modo que el concepto de energía proporcionó un vínculo unificador entre los fenómenos mecánicos y térmicos, el concepto de campo suministró a la electricidad, el magnetismo y la óptica un marco común de teorías físicas. Faraday carecía de formación matemática y no llegó a formular matemáticamente sus resultados, pero era intuitivamente brillante y paciente e hizo progresar la comprensión de los fenómenos electromagnéticos [2, 6].

El físico norteamericano Joseph Henry (1797-1878, Fig. 27), profesor en la *Albany Academy* y en el *Princeton College* es considerado, junto a Michael Faraday, co-descubridor independiente de la inducción electromagnética [6]. Los experimentos de Faraday sobre la inducción electromagnética fueron presentados en la *Royal Society* en noviembre de 1831, mientras que el trabajo de Henry fue publicado muy poco después (julio de 1832) en *Gillmas's Journal* en los Estados Unidos. Es posible que el descubrimiento de Henry de la inducción electromagnética pudiera ser anterior al de Faraday, pero lo cierto que el de este último fue publicado con anterioridad [6]. En cualquier caso, la ley de Faraday también se conoce como Ley de Faraday-Henry. Henry estudió el fenómeno de la inducción y autoin-

ducción experimentando con arrollamientos de varias bobinas y describió un primitivo motor eléctrico del que pensaba que “esta invención no tiene realmente mucha importancia, ya que en su estado actual el dispositivo sólo puede considerarse como un juguete filosófico; aunque ... con alguna modificación del mismo a mayor escala podrá en el futuro aplicarse con algún propósito útil” [6]. Respecto a sus experimentos sobre autoinducción señaló “tenemos ... electricidad convertida en magnetismo, y este magnetismo de nuevo convertido en electricidad [2, 6].

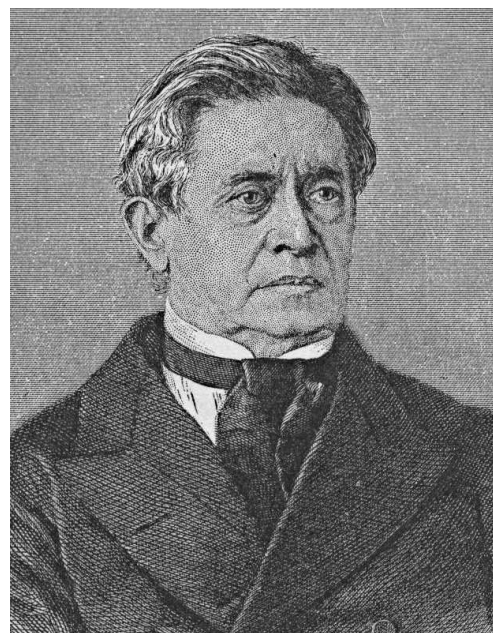


Figura 27 - Joseph Henry (1797-1878).

5. Maxwell: la síntesis electromagnética [4-6, 18]

Como señala José Manuel Sánchez Ron en su edición del libro de Maxwell “Materia y movimiento” [4]: “James Clerk Maxwell (1831-1879, Fig. 28) es uno de los científicos más importantes de toda la historia de la ciencia. No se puede comprender el siglo XIX - una centuria esencial para nosotros - sin tener en cuenta a figuras como Darwin, Lyell, Pasteur, Faraday o Helmholtz, pero mucho menos aún sin recordar a Maxwell, que nos dejó aportaciones científicas como la teoría del campo electromagnético, una de las creaciones científicas más originales e importantes que se han hecho jamás, tanto desde el punto de vista de la comprensión de los fenómenos naturales como en lo que se refiere a su aplicación al mundo de la técnica, y en particular al, hoy omnipresente universo de las telecomunicaciones” [4]. Maxwell es uno de los “grandes” de la historia de la física, junto con Newton y Einstein, que quizás son los únicos que le preceden claramente en un hipotética escala de “excelencia” [4, 5].

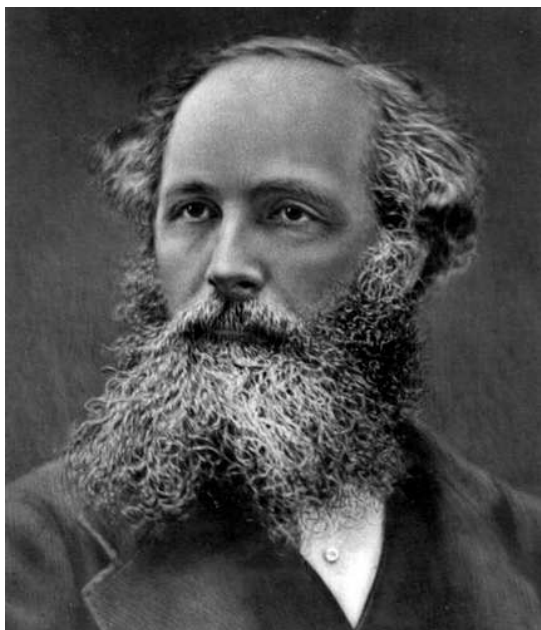


Figura 28 - James Clerk Maxwell (1831-1879).

Maxwell nació el 13 de julio de 1831 en Edimburgo en el seno de una familia acomodada. Su padre - aunque educado para la abogacía, tenía un gran interés por la tecnología -, que originalmente se llamaba John Clerk, adoptó el nombre de Maxwell cuando heredó ciertas propiedades que habían llegado a su familia a través de cierto matrimonio con un miembre de la familia Maxwell [4]. aunque educado para la abogacía, tenía un gran interés por la tecnología. Sin embargo, es a su madre a la que Maxwell debe sus primeras enseñanzas, hasta sus ocho años de vida, momento en el que la madre fallece a causa del cáncer. Tras tres años más recibiendo educación privada en la finca familiar de Glenlair (Fig. 29), a la edad de once años fue enviado a la escuela, a la *Edinburgh Academy*, en la que estuvo cinco años en los que aprendió francés, alemán, lógica, filosofía, química y matemáticas. A los quince años publicó su primer artículo científico sobre la geometría de curvas cónicas [4].



Figura 29 - Imagen de la casa de Maxwell en Glenlair.

En 1847 entró en la Universidad de Edimburgo donde, bajo la tutela de un profesor de física, fue autorizado a utilizar algunos aparatos en sus horas libres. Consumió muchas tardes experimentando y aprendiendo, incluso en sus vacaciones. Montó un laboratorio experimental “encima de la lavandería”, y usaba como mesa de laboratorio “una puerta vieja sobre dos barriles” [4]. Maxwell mantuvo una gran amistad con los también físicos Peter Tait (1831-1901, Fig. 30) y William Thomson, Lord Kelvin desde 1892 (1824-1907, Fig. 31) [17]. Los tres mantuvieron frecuentes intercambios epistolares sobre sus investigaciones. Su amistad con Tait, escocés como Maxwell, venía de sus años de estudiantes en la *Edinburgh Academy*. Thomson y Tait (en broma se referían a sí mismos como T y T’ [4]) escribieron el monumental *Tratado de filosofía natural* para poner de manifiesto las posibilidades de la nueva ciencia de la energética. Thomson fue el primero en utilizar el término “energía” en un sentido matemático nuevo y preciso. Además, Thomson confiaba en que la energía y sus ramificaciones irían mucho más allá de la termodinámica. La energía y sus componentes servirían para unificar la “filosofía natural” y, en particular, la electricidad, la luz y el magnetismo podían considerarse energía [4, 6].

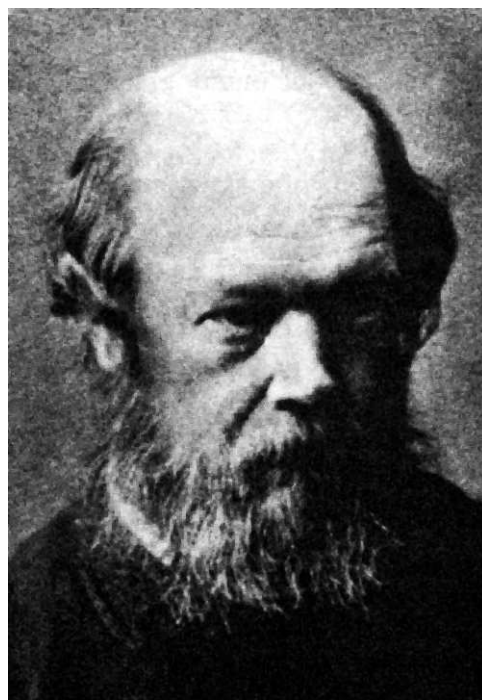


Figura 30 - Peter Tait (1831-1901).

En la Universidad de Edimburgo estudió los tres primeros cursos de una carrera de cuatro cursos, momento en el que dejó Edimburgo para marchar a la Universidad de Cambridge (Fig. 32), el centro más influyente de la física en aquella época, que no admitía estudiantes que ya tuvieran un título por otra universidad [4]. En

Cambridge, Maxwell fue admitido en uno de los centros académicos más prestigiosos: el *Trinity College*, el antiguo *College* de Newton. Para aquellos estudiantes con inclinaciones científicas, Cambridge poseía un atractivo añadido el *Tripes Matemático*, el sistema de exámenes en el que predominaban las preguntas de matemáticas y física teórica [4, 18].

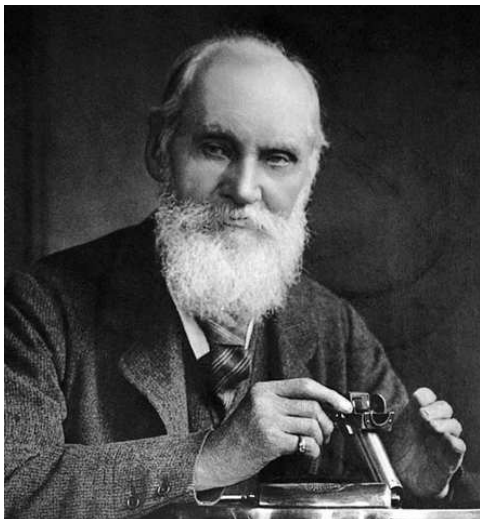


Figura 31 - William Thomson, Lord Kelvin desde 1892 (1824-1907).



Figura 32 - Universidad de Cambridge.

El *Tripes* estaba dividido en dos partes: la primera, que incluía pruebas todas las mañanas y todas las tardes, duraba cuatro días, y la segunda, de mayor dificultad y tras diez días de corrección de los exámenes, duraba cinco días [4, 18]. Los problemas que se plan-

teaban no eran triviales sino que se trataba de ejercicios de dificultad creciente cuya solución no era evidente. Además, no sólo se valoraba la capacidad de resolver los problemas sino también la rapidez y precisión. Los profesores que proponían los problemas no siempre sabían el modo de resolverlos y esperaban que algún alumno brillante lo consiguiera. Así, los ejercicios de los exámenes eran, a la vez, auténticos temas de investigación [4]. De hecho, algunos de los teoremas que hoy se estudian en física, como el teorema de Stokes y el vector de Poynting, son el fruto de ejercicios de exámenes de Cambridge. El estudiante que obtenía la mayor calificación en el *Tripes* era el *senior wrangler*, el segundo, *second wrangler*, y así sucesivamente. Llegar a *senior wrangler* era casi un honor nacional. Con algunas excepciones notables como Faraday o Joule, la mayoría de los principales físicos británicos que trabajaron entre 1820 y 1900 estudiaron en Cambridge y se examinaron del *Tripes* y a lo largo de la segunda mitad del siglo XIX cerca de la mitad de las cátedras de física de las universidades británicas fueron ocupadas por *wranglers* [4]. Fueron *senior wranglers* físicos como Stokes (1841), Cayley (1842), Tait (1852), Routh (1854), Lord Rayleigh (1865), Larmor (1880) y Eddington (1904) y otros *wranglers* famosos son Lamb (2°), Poynting (3°), J.J. Thomson (2°), William Bragg (3°) o Jeans (3°) [4, 18]. Sin embargo, y a pesar de su gran capacidad para la física y las matemáticas, Maxwell no consiguió el primer puesto del *Tripes* cuando se examinó en 1854, sino que fue *second wrangler*, detrás de Edward Routh (1831-1907), desde luego un físico notable, pero cuya obra posterior, centrada en la mecánica teórica, no se acerca ni de lejos a las contribuciones de Maxwell [4]. La formación de Maxwell en Cambridge, al igual que la de todos los estudiantes del *Tripes Matemático*, había sido totalmente teórica. El ideal del *Tripes* era la perfección, la permanencia, lo absoluto, lo constante. Asimismo, la exigencia del *Tripes* era muy grande y las largas horas de estudio, el estrés de la permanente competición académica y la tensión de los exámenes desembocaban muchas veces en enfermedades de sus alumnos. Maxwell cayó enfermo en 1853 y tuvo que ausentarse por unos meses durante sus estudios [4, 18].

De tanta importancia como ganar en el *Tripes*, en Cambridge también era codiciado el *Premio Adams* [4, 18]. Este Premio, que todavía hoy existe, se creó en 1848 y estaba sólo dirigido a los graduados de la Universidad de Cambridge. Su nombre se debe al astrónomo John Couch Adams que predijo la existencia del planeta Neptuno basándose sólo en cálculos matemáticos. Esta premio era concedido cada dos años al mejor trabajo sobre un tema propuesto por un comité. El concurso para el año 1856 tenía el siguiente título: “El movimiento de los anillos de Saturno” [4]. En aquella época se pensaba que dichos anillos eran un material fluido, aunque realmente el tema no estaba claro. Maxwell

se presentó a dicho premio y lo ganó en 1857, aunque compartido con Routh. El trabajo de Maxwell llevaba por título “Sobre la estabilidad del movimiento de los anillos de Saturno” y en él concluyó que la única estructura que puede explicar dicha estabilidad era que estuviesen constituidos por un enjambre de partículas desconectadas. El trabajo de Maxwell no sólo ganó el Premio Adams sino que también ganó el elogio de toda la comunidad científica. George Airy, astrónomo de la Casa Real Británica, lo calificó como una aplicación notabilísima de las matemáticas. Dicha estructura fue confirmada en 1895 por el astrónomo estadounidense Keeler [4].

Tras finalizar sus estudios en Cambridge, en 1856 Maxwell ganó la cátedra de filosofía natural del Mariscal College de Aberdeen, donde estuvo cuatro años. En Aberdeen contrajo matrimonio en 1858 con Catherine Mary Dejar (1824-1886), hija del *principal* del *college* [4]. Sus siguientes investigaciones fueron sobre la teoría de los colores y en 1860 abandonó su cátedra de Aberdeen para ocupar otra en el *King College* de Londres, donde estuvo cinco años (1860-1865), siendo elegido *fellow* de la *Royal Society* en 1861. En 1865 abandonó su cátedra de Londres para volver a su finca escocesa de Glenlair donde escribió dos libros, uno de ellos de carácter general, pero con numerosas ideas novedosas y originales, *Teoría del Calor*, y el otro su gran obra, publicada en 1873, *Tratado de Electricidad y Magnetismo* [4], texto cumbre de la física del siglo XIX y comparable al libro paradigmático de Newton titulado *Principios Matemáticos de Filosofía Natural* y publicado casi dos siglos antes, en 1687. En esta obra Maxwell consigue unificar, bajo un mismo paradigma, todos los fenómenos conocidos hasta el momento sobre electricidad y magnetismo [18]. Sus ecuaciones se presentan de un modo elegante y brillante la unidad que subyace en todos estos fenómenos, a la vez que deduce consecuencias sorprendentes como la existencia de ondas electromagnéticas y que la luz es un tipo de estas ondas [18]. Igual que Thomson y Tait, Maxwell intentaba crear los cimientos de una nueva ciencia integral basada en el concepto de la energía y se mantuvo firme en que la energía electromagnética y el éter no eran entidades hipotéticas, sino tan reales como cualquier otra cosa del universo [4]. De este modo, para los físicos británicos del siglo XIX, el éter se convirtió rápidamente en la encarnación de la energía y muchos de ellos llegaron a considerar que la física de la energía equivalía prácticamente a la física del éter y algunos de ellos entendieron que el objetivo principal de su disciplina era desentrañar las propiedades físicas y matemáticas del éter [4-6].

El *Tratado* de Maxwell consiguió establecer los principios básicos, eternos, inviolables y absolutos de la ciencia electromagnética y ésta pasó desde entonces a formar parte del conjunto de las ciencias adultas [18]. El trabajo de los científicos debía consistir en deducir el máximo número de consecuencias posible y a éste se dedicaron todo un ejército de “maxwellianos” [4, 18]. Asimismo, el *Tratado de Electricidad y Magnetismo*

de Maxwell es un claro producto del modo de hacer ciencia propio de un alumno del *Tripes Matemático* de Cambridge [4, 18]. Su uso de los métodos del análisis matemático y su confianza en el poder de los modelos mecánicos para explicar todos los fenómenos naturales son prueba de ello. De hecho, en las últimas décadas del siglo XIX este libro de Maxwell se convirtió en el gran libro de texto de los alumnos de Cambridge, cuya formación les permitía entender los métodos utilizados, mientras que físicos de renombre formados en otras universidades tenían dificultad en seguir sus razonamientos [4, 5].

En 1871 fue designado para ocupar la recién creada cátedra de Física Experimental de la Universidad de Cambridge en la que su deber principal era enseñar las leyes del calor, la electricidad y el magnetismo y dedicarse al avance del conocimiento de tales temas, deber que cumplió con creces [4]. En 1873 se le dotó de un nuevo laboratorio, el Laboratorio Cavendish (Fig. 33), construido gracias a la generosidad de William Cavendish, séptimo duque de Devonshire, perteneciente a una rama colateral de la familia de Henry Cavendish. Fue el primer director de dicho laboratorio y otros directores que le precedieron fueron Lord Rayleigh, J.J. Thomson (el descubridor del electrón) [18] o E. Rutherford. Desde entonces 29 Premios Nobel han trabajado en el Laboratorio Cavendish, incluidos Watson y Crick, los descubridores de la estructura del ADN [4, 18]. Una de las misiones de Maxwell era poner en orden y editar los veinte paquetes de documentos sobre electricidad de Henry Cavendish, los cuales fueron publicados en 1879. A principios de 1879 la salud de Maxwell empezó a resentirse y decidió pasar las vacaciones de verano en su finca escocesa de Glenlair. Pero en vez de mejorar, cada vez estaba peor. De todos modos en octubre decidió regresar a Cambridge, a pesar de que apenas podía mantenerse en pie y, ciertamente, no podía impartir clase. Maxwell falleció el 5 de noviembre de 1879, a los 48 años de edad [18].



Figura 33 - Laboratorio Cavendish de la Universidad de Cambridge.

Son dos las grandes aportaciones a la física realizadas por Maxwell y que pueden englobarse en dos

campos: el electromagnetismo y la física estadística. Por lo que se refiere al electromagnetismo, realizó la formulación matemática de las ideas de Faraday, al que admiraba profundamente. Para ello aceptó las ideas intuitivas de Faraday sobre la existencia de campos eléctricos y magnéticos y su concepto de líneas de fuerza, abandonando definitivamente la doctrina clásica mantenida hasta entonces de las fuerzas eléctricas y magnéticas como acciones a distancia [4]. Maxwell propuso veinte ecuaciones que relacionan las variables de los campos eléctricos y magnéticos y que rigen el comportamiento de la interacción electromagnética. En 1884 Oliver Heaviside (1850-1925), con la ayuda de Willard Gibbs (1839-1903), sintetizó estas ecuaciones en las cuatro ecuaciones de Maxwell tal y como se conocen hoy en día (Fig. 34) [4, 6].

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{B} &= \mu_0 \left(\vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)\end{aligned}$$

Figura 34 - Ecuaciones de Maxwell en forma diferencial (en el vacío).

Estas ecuaciones son la ley de Gauss del campo eléctrico, la ley de Gauss del campo magnético, la ley de Faraday-Henry de la inducción electromagnética y la ley de Ampère-Maxwell, en la que la contribución de Maxwell fue fundamental al incluir el término que él denominó “corriente de desplazamiento” y que permite concluir que un campo eléctrico variable con el tiempo puede dar lugar a un campo magnético. Estas ecuaciones resumen las leyes experimentales del electromagnetismo y con ellas Maxwell mostró como electricidad y magnetismo no son sino manifestaciones diferentes de un mismo sustrato físico, electromagnético, como poco menos de medio siglo después mostraría con más claridad Einstein al formular su teoría especial de la relatividad. Las ecuaciones de Maxwell desempeñan en el electromagnetismo clásico un papel análogo a las leyes de Newton en la mecánica clásica y proporcionan una base teórica completa para el tratamiento de los fenómenos electromagnéticos clásicos. Boltzmann consideró que estas ecuaciones eran tan bellas por su simplicidad y elegancia que, como Goethe, preguntó, “¿Fue un dios quien escribió estas líneas ...?” [4].

En su artículo “Sobre las líneas de fuerza de Faraday” publicado en 1856 presentó una primera versión de las ecuaciones del campo electromagnético. En esta y otras publicaciones posteriores, proporcionó una explicación matemática de las explicaciones de Faraday sobre los fenómenos eléctricos y magnéticos en función de la distribución de líneas hipotéticas de fuerza en el

espacio [4, 6]. Para representar su teoría Maxwell creó un complejo modelo mecánico de vórtices moleculares y ruedas intermedias [4, 5]. Su teoría matemática describía el éter, donde la energía se almacenaba y se transformaba pasando de una forma a otra. En su trabajo de 1861-1862, “Sobre líneas físicas de fuerza”, señaló “difícilmente podemos evitar la inferencia de que la luz no es otra cosa que ondulaciones transversales del mismo medio que es la causa de los fenómenos eléctricos y magnéticos” [4]. Finalmente, mientras trabajaba en su artículo “Una teoría dinámica del campo electromagnético” publicado en 1865 llegó a comentar “también tengo un artículo a flote, con una teoría electromagnética de la luz, que, salvo que me convenza de lo contrario, considero de gran valor” [4].

Maxwell demostró que las ecuaciones del campo electromagnético podían combinarse para originar una ecuación de onda que debían satisfacer los vectores de campo eléctrico y magnético y propuso la existencia de las ondas electromagnéticas (Fig. 35). Al calcular la velocidad de propagación de estas ondas (en el vacío) obtuvo el valor de la velocidad de la luz, concluyendo que la luz también era una onda electromagnética. Con su teoría del campo electromagnético, Maxwell logró unir en un mismo marco teórico electricidad, magnetismo y óptica. Las ondas electromagnéticas fueron producidas por primera vez en el laboratorio en 1888 por Heinrich Hertz (1857-1894, Fig. 36) - uno de los alumnos de Von Helmholtz - lo que suponía una sólida confirmación de la teoría maxwelliana y una victoria sobre los ingenieros eléctricos prácticos como William Preece, jefe del departamento del telégrafo de Correos, el cual negaba la aplicabilidad de la física maxwelliana a cuestiones de ingeniería práctica [4, 5, 18]. Esta predicción de Maxwell es la base de la transmisión de información sin cables: las ondas de radio y de televisión, por ejemplo.

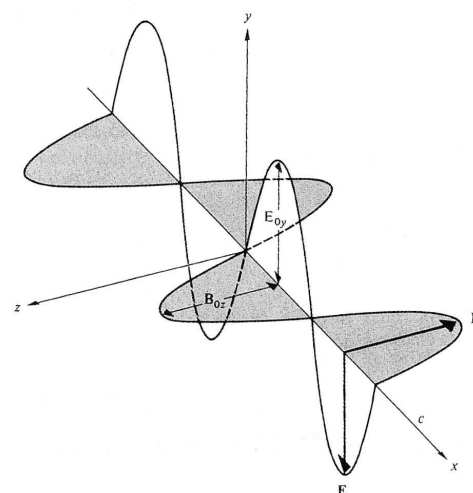


Figura 35 - Ondas electromagnéticas planas.



Figura 36 - Heinrich Hertz (1857-1894).

La teoría electromagnética de Maxwell fue continuada y refinada por Hendrik A. Lorentz (1853-1928, Fig. 37) que explicó utilizando la teoría de Maxwell varios fenómenos como la reflexión y la refracción de la luz [6, 14]. También propuso que un campo electromagnético ejerce una fuerza sobre una carga que se mueve dentro de él con una velocidad (fuerza de Lorentz), suma de la fuerza eléctrica y la fuerza magnética. Lorentz, a partir de 1892, propuso la existencia de partículas con carga eléctrica positiva y negativa y consideró que una corriente eléctrica se debe al movimiento de cargas, introduciendo de este modo el carácter corpuscular para la electricidad [6]. En 1891 el físico irlandés George J. Stoney (1826-1911) sugirió llamar electrones a las cargas unitarias negativas y en 1897, Joseph John Thomson (1856-1940) determinó experimentalmente la relación carga/masa de los electrones [4, 18].

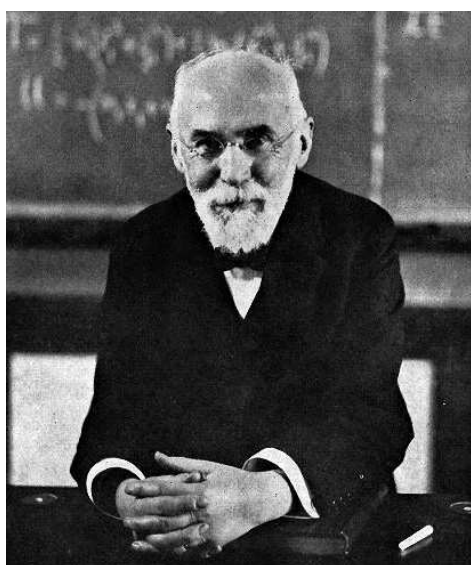


Figura 37 - Hendrik A. Lorentz (1853-1928).

Aunque la obra de Maxwell fue majestuosa y extensa tuvo ciertas limitaciones sobre todo por los problemas suscitados por la teoría del electrón y la electrodinámica de los cuerpos en movimiento, es decir, a la hora de conciliar la mecánica de Newton y el electromagnetismo [4, 6], problema este último que fue resuelto por Albert Einstein (1879-1955, Fig. 38) en 1905 con su teoría especial de la relatividad. Tras los trabajos de Einstein, el éter luminoso - el centro de atención de tantas investigaciones físicas del siglo XIX - estaba muerto y enterrado [4, 6, 8, 18].



Figura 38 - Albert Einstein (1879-1955).

Para concluir, y como ya se ha señalado con anterioridad, James Clerk Maxwell es el tercer gran nombre de la historia de la física, junto con Newton y Einstein [4]. La “síntesis” de Maxwell, es decir, la unificación de la electricidad, el magnetismo y la luz, sin duda marcó un hito importante en la historia de la unificación de las fuerzas físicas hasta tal punto que, a finales del siglo XIX, entre los físicos estaba extendida la opinión de que las leyes físicas ya estaban suficientemente comprendidas [4-8]. Esta opinión condujo a la famosa afirmación del físico norteamericano Albert A. Michelson (1852-1931), en 1894, de que ya no se realizarían más descubrimientos fundamentales; a los sumo se perfeccionarían las determinaciones de las constantes físicas alcanzando seis o siete cifras decimales [6, 8]. Nada más lejos de la realidad, pues en el comienzo del siglo XX se produjeron dos cambios trascendentes en el paradigma de la física, con la introducción de la teoría de la relatividad y la física cuántica. En ambos casos se trata de una ruptura con el paradigma básico vigente en toda la física clásica desde Newton y que fue plenamente aceptado y permaneció inamovible hasta los albores del siglo XX [4-8].

El texto de este artículo está basado en la conferen-

cia “El electromagnetismo: la *unificación* óptica, electricidad y magnetismo (Maxwell)” impartida por el autor dentro del II Curso de Ciencias “La Ciencia Europea durante el siglo XIX: el desarrollo de la Física Clásica” celebrado en Gandía (España) del 30 de julio al 3 de agosto de 2007. La información sobre las biografías de Oersted y Ampère se ha extraído fundamentalmente de la referencia [1], la de Faraday de la [2] y la de Maxwell de la [4].

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento al Profesor Francisco González de Posada de la Universidad Politécnica de Madrid por su invitación a participar en el “II Curso de Ciencias” celebrado en Gandía en julio 2007.

Referencias

- [1] M.C. Pérez de Landazábal y P. Varela Nieto, *Orígenes del Electromagnetismo. Oersted y Ampère* (Nívola Libros y Ediciones, Madrid, 2003).
- [2] J.A. Díaz-Hellín, *El Gran Cambio de la Física. Faraday* (Nívola Libros y Ediciones, Madrid, 2001).
- [3] W.E. Gettys, F.J. Keller y M.J. Skove, *Física Clásica y Moderna* (McGraw-Hill, Madrid, 1991).
- [4] J.C. Maxwell, *Materia y Movimiento* (Editorial Crítica, Barcelona, 2006), edición y traducción de J.M. Sánchez Ron.
- [5] J. Ordóñez, V. Navarro y J.M. Sánchez Ron, *Historia de la Ciencia* (Editorial Espasa-Calpe, Madrid, 2007).
- [6] A. Udías Vallina, *Historia de la Física. De Arquímedes a Einstein* (Editorial Síntesis, Madrid, 2004).
- [7] G. Gamow, *Biografía de la Física* (Alianza Editorial, Madrid, 1980).
- [8] G. Holton y S.G. Brush, *Introducción a los Conceptos y Teorías de las Ciencias Físicas* (Editorial Reverté, Barcelona, 1988).
- [9] S.L. Bragatto Boss y J.J. Caluzi, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **29**, 635 (2007).
- [10] P.J. Bowler y I.R. Morus, *Panorama General de la Ciencia Moderna* (Editorial Crítica, Barcelona, 2007).
- [11] F.W.O. da Silva, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **29**, 149 (2007).
- [12] M. Lozano, *De Arquímedes a Einstein. Los Diez Experimentos más Bellos de la Física* (Editorial Debate, Barcelona, 2005).
- [13] R.P. Crease, *El Prisma y el Péndulo: Los Diez Experimentos más Bellos de la Ciencia* (Editorial Crítica, Barcelona, 2006).
- [14] E. Hecht y A. Zajac, *Óptica* (Fondo Educativo Interamericano, México, 1977).
- [15] J.P.M.C. Chaib y A.K.T. Assis, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **29**, 41 (2007).
- [16] J.P.M.C. Chaib y A.K.T. Assis, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **29**, 65 (2007).
- [17] J.T. Lloyd, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **29**, 499 (2007).
- [18] J. Navarro, *El Padre del Electrón. J.J. Thomson* (Nívola Libros y Ediciones, Madrid, 2006).